

УДК 52.13-14;521.35;523.45

НАБЛЮДЕНИЯ ГАЛИЛЕЕВЫХ СПУТНИКОВ ЮПИТЕРА В 2018 г. В ПУЛКОВЕ

© 2019 г. Н. В. Нарижная^а, *, М. Ю. Ховричев^а, Д. А. Бикулова^а

^аГлавная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: Narizhnaya.nat@yandex.ru

Поступила в редакцию 19.12.2018 г.

После доработки 20.03.2019 г.

Принята к публикации 20.03.2019 г.

В работе представлены результаты наблюдений галилеевых спутников Юпитера, выполненных в 2018 г. на Нормальном астрографе в Пулковской обсерватории. Получено 452 положения галилеевых спутников Юпитера в системе каталога Gaia DR1 (ICRF, J2000.0) и 671 разность координат спутников относительно друг друга. Средние ошибки нормальных мест спутников по прямому восхождению и склонению за весь наблюдательный период, демонстрирующие внутреннюю сходимость результатов наблюдений, получились равными: $\epsilon_\alpha = 0.003''$, $\epsilon_\delta = 0.003''$. Ошибки одной разности соответственно равны: $\sigma_\alpha = 0.070''$, $\sigma_\delta = 0.067''$. Проведено сравнение полученных экваториальных координат спутников с восемью теориями движения планет и спутников. В среднем разности (О–С) по обеим координатам относительно теорий движения составляют 0.014". Лучшее согласие с наблюдениями дают комбинации всех четырех спутниковых теорий движения с планетной теорией EPM2017, средние значения (О–С) для каждой из них равно 0.01". Выполнено сравнение новых результатов с сезоном наблюдений 2016–2017 гг. Как и ранее отмечены особенности поведения разностей (О–С) у спутников Ио и Ганимеда.

Ключевые слова: галилеевы спутники Юпитера, точные положения, планетные теории, теории движения спутников, ПЗС-наблюдения

DOI: 10.1134/S0320930X19040066

ВВЕДЕНИЕ

В исследовании динамики Солнечной системы фундаментальную роль играют астрометрические наблюдения планет и их естественных спутников. Они необходимы при построении и уточнении теорий движения данных тел, а также для оценки точности уже существующих эфемерид. Высокоточные эфемериды важны для оперативного предвычисления взаимных покрытий и затмений галилеевых спутников и других естественных небесных конфигураций (Morgado и др., 2019), а также для поддержки различных космических миссий и проектов. Длительные ряды такого рода астрометрических наблюдений обеспечивают однородность полученных данных в систематическом отношении. Естественное свойство подобных рядов наблюдений состоит в том, что в них остаются недоисключенные систематические ошибки. Для использования таких данных при построении эфемерид важно, чтобы остаточные систематические ошибки были стабильны. Это даст возможность элиминировать их, привлекая однородные ряды, полученные с помощью других инструментов. Длительность этих наблюдений во времени позволит получить

представление о долговременной эволюции орбит, а также изучить и оценить динамические эффекты, определяющие этот процесс. Например, такие как приливная диссипация и резонансы (Lainey, 2016). Пулковская обсерватория наряду с другими российскими и зарубежными обсерваториями, участвует в этой программе наблюдений (Киселева и др., 2008; Грошева и др., 2011; Нарижная и др., 2018; Peng и др., 2012; Arlot и др., 2017; Del Rio Gaztelurrutia и др., 2018).

НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

В нашей работе представлены очередные результаты астрометрических ПЗС-наблюдений галилеевых спутников Юпитера, выполненных в 2018 г. на Нормальном астрографе ($D/F = 330/3467$ мм). Приемником излучения служила ПЗС-камера (SBIG ST-L-11K 3 CCD Camera – рабочее поле: $35' \times 25'$, масштаб: $0.530''/\text{пиксел}$). С 2017 г. в наблюдениях использовался фильтр R, оказавшийся оптимальным для астрометрических наблюдений на Нормальном астрографе. Всего за наблюдательный сезон (28 ночей) было получено и обработано 2590 ПЗС-кадров с изоб-

ражениями галилеевых спутников: Ио (J1), Европа (J2), Ганимед (J3), Каллисто (J4) и звезд окрестности. Наблюдения выполнялись с экспозицией 10 с, позволявшей нам получать с каждого кадра прямые измерения экваториальных координат этих объектов и звезд до 14^m (минимальное значение $\text{SNR} = 20$, FWHM менялась в пределах от $2.6''$ до $3.9''$). Юпитер наблюдался в диапазоне зенитных расстояний 75° – 80° , что сильно осложнило анализ результатов наблюдений. Неслучайно при построении теории рефракции упоминается, что полный учет влияния этого фактора при $Z > 70^\circ$ невозможен без специальных исследований (Nauenberg, 2017). Тем не менее, как показали тестовые наблюдения, в случае относительных определений при сравнительно коротких экспозициях риск оправдан.

Данное исследование является продолжением серии работ, поэтому для сохранения преемственности в контексте систематических ошибок мы решили использовать в качестве опорного каталог Gaia DR1 (Arenou и др., 2017). Как оказалось, для данного каталога число опорных звезд получалось от 17 до 46 на одном кадре, что делало условия наблюдений более приемлемыми при таком низком положении планеты над горизонтом. Для вычисления нормальных мест, полученные положения объектов разбивались на группы по 10-минутным временным интервалам. Усреднение в таких промежутках времени выполнялось с использованием линейной аппроксимации, поскольку видимое движение спутников за это время допустимо считать прямолинейным.

Для автоматизации измерений полученного нами большого массива кадров использовался созданный ранее набор приложений JSA. Все детали процесса обработки наблюдений изложены в предыдущей нашей работе (Нарижная и др., 2018). Здесь мы лишь приведем общую схему. Для каждого кадра осуществлялась процедура отождествления с рисунком опорных звезд (определялись wcs-параметры перехода от пиксельных координат к экваториальным и обратно). Далее формировалась медианная ФРТ (функция рассеяния точки) с помощью shapelet-разложения изображений отдельных звезд. Определение итоговых пиксельных координат звезд и спутников производились путем варьирования координат фотоцентра ФРТ и величины потока методом Левенберга–Марквардта.

Измерения не выполнялись, если спутники попадали в зону перенасыщения изображения из-за яркого Юпитера. При использовании JSA автоматически отбраковываются снимки, имеющие средние значения FWHM, на “3-сигма” отличающиеся от средних за данную ночь.

Астрометрическая редукция выполнялась методом шести постоянных. Ошибки единицы веса получались от $0.01''$ до $0.12''$ в зависимости от качества изображения. В результате для каждого

кадра определялись экваториальные координаты спутников Юпитера в системе каталога Gaia DR1. Получено 452 положения галилеевых спутников Юпитера в системе каталога Gaia DR1 (ICRF, J2000.0).

СРАВНЕНИЕ НАБЛЮДЕНИЙ С ТЕОРИЕЙ И АНАЛИЗ ВНЕШНЕЙ ТОЧНОСТИ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ результатов наших наблюдений был выполнен путем сравнения их с шестнадцатью вариантами, использующими комбинации четырех современных теорий движения спутников Юпитера: V. Lainey-V.2.0|V1.1, V. Lainey-V.1.1, J.-E. Arlot-G5, J.H. Lieske-E5 (Lainey и др., 2006; 2004a; 2004b; Lieske, 1998; Arlot, 1982) и четырех планетных теорий: EPM2017, INPOP17a, INPOP08, DE431 (Питьева, Павлов, 2017; Pitjeva, Pitjev, 2018; Viswanathan и др., 2017; 2018; Fienga и др., 2009; Folkner и др., 2014). Эфемериды обеспечивались Службой естественных спутников планет “MULTI-SAT” (Емельянов и др., 2006; Eme’lyanov, Arlot, 2008). С помощью данного сервиса (<http://nsdb.imcce.fr/multisat/nssephme.htm>) вычислялись разности между наблюдаемыми и теоретическими координатами по прямому восхождению $(O-C)_\alpha$ и склонению $(O-C)_\delta$ для всех четырех галилеевых спутников Ио, Европа, Ганимед и Каллисто. Качество результатов наблюдений характеризуют средние значения величин $(O-C)$, величины стандартных ошибок нормальных мест (ϵ_α , ϵ_δ) и ошибок одного наблюдения (σ_α , σ_δ). Чтобы не перегружать текст статьи, эти оценки представлены отдельно ($O-C$ – в табл. 1, а оценки точности – в табл. 2). Более наглядное представление о точности наблюдений обеспечивают максимальные значения ошибок, приведенные в табл. 2.

В табл. 1 приведены значения разностей $(O-C)$ по обоим координатам, усредненные за весь период наблюдений, для выбранных нами 16 комбинаций теорий движения. Оценки точности полученных значений $(O-C)$ вычислялись по стандартным формулам:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (x_j - x_{\text{mean}})^2}{N-1}}; \quad \epsilon_x = \frac{\sigma_x}{\sqrt{N}},$$

где x – случайная величина, распределенная по нормальному закону, принимающая значения $x_j (j = 1, \dots, N)$; x_{mean} – среднее арифметическое величины x ; σ_x – среднеквадратическое отклонение; ϵ_x – ошибка среднего.

В табл. 2 представлены максимальные (σ_{max} , ϵ_{max}) и минимальные (σ_{min} , ϵ_{min}) ошибки, выраженные в секундах дуги, характеризующие величины $(O-C)$, приведенные в табл. 1. В таблице также приводится итоговое число положений N ,

Таблица 1. Средние значения разностей (O–C) по обеим координатам для галилеевых спутников при использовании вариаций четырех современных теорий движения спутников и четырех версий планетной теории, все значения даны в секундах дуги

Теория движения спутника	Ио (J1)		Европа (J2)		Ганимед (J3)		Каллисто (J4)	
	(O–C) _α	(O–C) _δ	(O–C) _α	(O–C) _δ	(O–C) _α	(O–C) _δ	(O–C) _α	(O–C) _δ
Планетная теория EPM2017								
V. Lainey V2.0	0.007	0.009	0.003	0.015	0.007	0.006	0.024	0.011
V. Lainey V1.1	0.010	0.010	0.005	0.015	0.009	0.007	0.019	0.012
J.-E. Arlot G5	0.028	0.009	–0.001	0.012	0.005	0.004	–0.010	0.020
D. Lieske E5	0.015	0.008	–0.007	0.013	–0.002	0.005	–0.002	0.018
Планетная теория INPOP17a								
V. Lainey V2.0	0.026	0.011	0.022	0.017	0.025	0.009	0.042	0.013
V. Lainey V1.1	0.029	0.012	0.023	0.018	0.028	0.010	0.037	0.015
J.-E. Arlot G5	0.047	0.011	0.018	0.014	0.024	0.006	0.009	0.022
D. Lieske E5	0.033	0.011	0.012	0.015	0.016	0.007	0.017	0.020
Планетная теория INPOP08								
V. Lainey V2.0	–0.043	–0.026	–0.053	–0.024	–0.047	–0.027	–0.030	–0.022
V. Lainey V1.1	–0.041	–0.025	–0.051	–0.023	–0.045	–0.026	–0.035	–0.020
J.-E. Arlot G5	–0.023	–0.026	–0.057	–0.026	–0.049	–0.029	–0.064	–0.013
D. Lieske E5	–0.036	–0.026	–0.063	–0.025	–0.056	–0.028	–0.056	–0.015
Планетная теория DE431								
V. Lainey V2.0	0.023	0.006	0.019	0.012	0.022	0.003	0.039	0.008
V. Lainey V1.1	0.025	0.007	0.020	0.012	0.025	0.004	0.034	0.009
J.-E. Arlot G5	0.044	0.006	0.015	0.009	0.020	0.001	0.006	0.017
D. Lieske E5	0.030	0.005	0.008	0.010	0.013	0.002	0.014	0.015

Таблица 2. Среднеквадратические отклонения (σ_min; σ_max) и ошибки среднего (ε_min, ε_max) для среднеарифметических величин (O–C) по обеим координатам для 12 комбинаций теорий движения Юпитера и Галилеевых спутников, величины приводятся в секундах дуги

Спутник	N	(O–C) _α				(O–C) _δ			
		σ_min	ε_min	σ_max	ε_max	σ_min	ε_min	σ_max	ε_max
Ио	100	0.062	0.006	0.100	0.010	0.062	0.006	0.065	0.006
Европа	102	0.076	0.007	0.080	0.008	0.063	0.007	0.080	0.008
Ганимед	131	0.067	0.006	0.128	0.011	0.067	0.006	0.093	0.008
Каллисто	119	0.068	0.006	0.162	0.015	0.070	0.006	0.071	0.006

полученных для каждого спутника за весь наблюдательный период. Самые большие интервалы (разброс по точности) среднеквадратических отклонений (σ_min, σ_max) для среднеарифметических величин (O–C) были получены по прямому восхождению для Каллисто, а по склонению для Ганимеда. Сами же среднеквадратические ошибки также получились наибольшими для Каллисто по прямому восхождению и для Ганимеда по склонению. Это согласуется с ранее полученными результатами (Нарижная, 2016; Нарижная и др., 2018).

При анализе значений средних разностей (O–C) в табл. 1, полученных по четырем теориям движения Юпитера, отмечается хорошее согласие с на-

блюдениями трех из них (INPOP2017a, EPM2017 и DE431) для всех галилеевых спутников. Необычно выделяются результаты применения планетной теории INPOP08. Средние значения разностей (O–C) при ее использовании стабильно имеют отрицательные значения по обеим координатам. По абсолютной величине же средние разности (O–C) получились максимальными по всем спутниковым теориям. Среднее значение разности (O–C) по обеим координатам равно –0.035″, а по трем остальным планетным теориям +0.014″. Следует отметить также для этих трех теорий, что средние значения разностей (O–C) по прямому восхождению в среднем в 1.7 раза больше чем по склонению. Поскольку такое по-

Таблица 3. Средние разности (О–С) по обеим координатам относительно всех выбранных теорий движения по четырем сезонам наблюдений

Сезоны наблюдений	2009–2011 гг.	2013–2015 гг.	2016–2017 гг.	2018 г.
(О–С) по обеим координатам	0.080"	0.050"	0.031"	0.014"

ведение разностей (О–С) не повторяется от одного наблюдательного сезона к другому, возможной причиной таких результатов могут быть сложные наблюдательные условия, взаимодействие изображений и некоторые другие неучтенные систематические эффекты. Несовершенство теорий движения тоже вносит свой вклад, но в меньшей степени.

Лучшее согласие с наблюдениями дают комбинации планетной теории движения EPM2017 с каждой из четырех спутниковых теорий: V. Lainey-V.2.0|V1.1, V. Lainey-V.1.1, J.-E. Arlot-G5, J.H. Lieske-E5. Средние значения (О–С) при которых равно 0.01".

В табл. 3 представлены средние (О–С) по обеим координатам, выраженные в угловых секундах, относительно всех применявшихся теорий движения, выбранных нами для оценки сходимости реальных наблюдений с теориями движения планет и спутников. Эти величины были получены в течение указанных там же сезонов наблюдений (Нарижная, 2015; 2016; Нарижная и др., 2018). При оценке результатов, полученных в течение четырех сезонов наших наблюдений, можно отметить их значительное постепенное улучшение. Главная причина, скорее всего, состоит в использовании все более современных теорий движения для оценки результатов и в росте точности координат слабых опорных звезд в Gaia DR1. Однако немаловажную роль играет также совершенствование методов обработки изображений и использование нового приемника излучения (ПЗС-камеры) с улучшенным разрешением матрицы (от 0.952"/пиксел до 0.530"/пиксел).

На рис. 1 приведены гистограммы, характеризующие распределение разностей (О–С) по прямому восхождению и склонению для всех четырех спутников за весь наблюдательный период. Использовались теории движения EPM2017 и V. Lainey-V.2.0|V1.1. Рисунок демонстрирует распределение разностей (О–С), соответствующее нормальному закону для всех галилеевых спутников, кроме Ио по склонению.

При измерении цифровых изображений галилеевых спутников близость их к Юпитеру создает сложную проблему учета ореола планеты. Для того чтобы оценить на сколько эффективно мы его учли, были построены графики поведения разностей (О–С) по прямому восхождению и склонению в зависимости от видимого углового расстояния (S) между Юпитером и галилеевыми спутниками. Разности (О–С) рассчитаны по эфемеридам согласно теориям EPM2017 и V. Lainey-V.2.0|V1.1. На

рис. 2 приведены полученные результаты с их ошибками. Среднее значение (О–С) за весь период наблюдений отмечено сплошной линией. При малых S ($S < 50''$) у всех спутников заметен довольно большой разброс точек. Это вполне объяснимо, поскольку изображение спутника под влиянием ореола планеты становится передержанным. В результате этого сильно растут систематические ошибки определения координат. В пределах ошибок измерений в поведении разностей (О–С) очевидных зависимостей не отмечено. Однако можно предположить наличие слабых трендов в положениях Ио и Ганимеда в (О–С) по склонению. Правда, соответствующие корреляции между зависимостями для разных спутников при одинаковых S не наблюдаются. Это говорит о невысокой вероятности их связи с засветкой от Юпитера. Поэтому стоит искать иные генераторы систематической ошибки данного вида. Большая часть разностей укладывается в сотые доли угловой секунды, поэтому в пределах ошибок измерений приводим результаты без попытки учета неизвестных систематических эффектов, природа которых неясна. Средние ошибки нормальных мест спутников по прямому восхождению и склонению за весь наблюдательный период, демонстрирующие внутреннюю сходимость результатов наблюдений, получились равными: $\epsilon_\alpha = 0.003''$, $\epsilon_\delta = 0.003''$, а соответствующие среднеквадратические отклонения равны: $\sigma_\alpha = 0.070''$, $\sigma_\delta = 0.067''$.

Используя Службу естественных спутников планет "MULTI-SAT" и определенные нами экваториальные координаты галилеевых спутников, мы получили дифференциальные координаты спутников относительно друг друга. Всего получено 671 относительное положение. Полученные в итоге экваториальные координаты галилеевых спутников и дифференциальные координаты спутников подготовлены к отправке в Центр астрономических данных в Страсбурге (The Centre de données astronomiques de Strasbourg – CDS) и базу данных NSDB (Arlot, Emelyanov, 2009).

Разности (О–С), вычисленные по нашим исследованиям, представляют собой подходящий материал для оценки точности полученных результатов. В табл. 4а и 4б приводятся средние (О–С), их среднеквадратические ошибки (σ), вычисленные по дисперсии разностей (О–С), ошибки среднего (ϵ) и число использованных положений объектов (N) за весь наблюдательный период для двух разных видов результатов – для экваториальных координат (α , δ) галилеевых спутников и для относи-

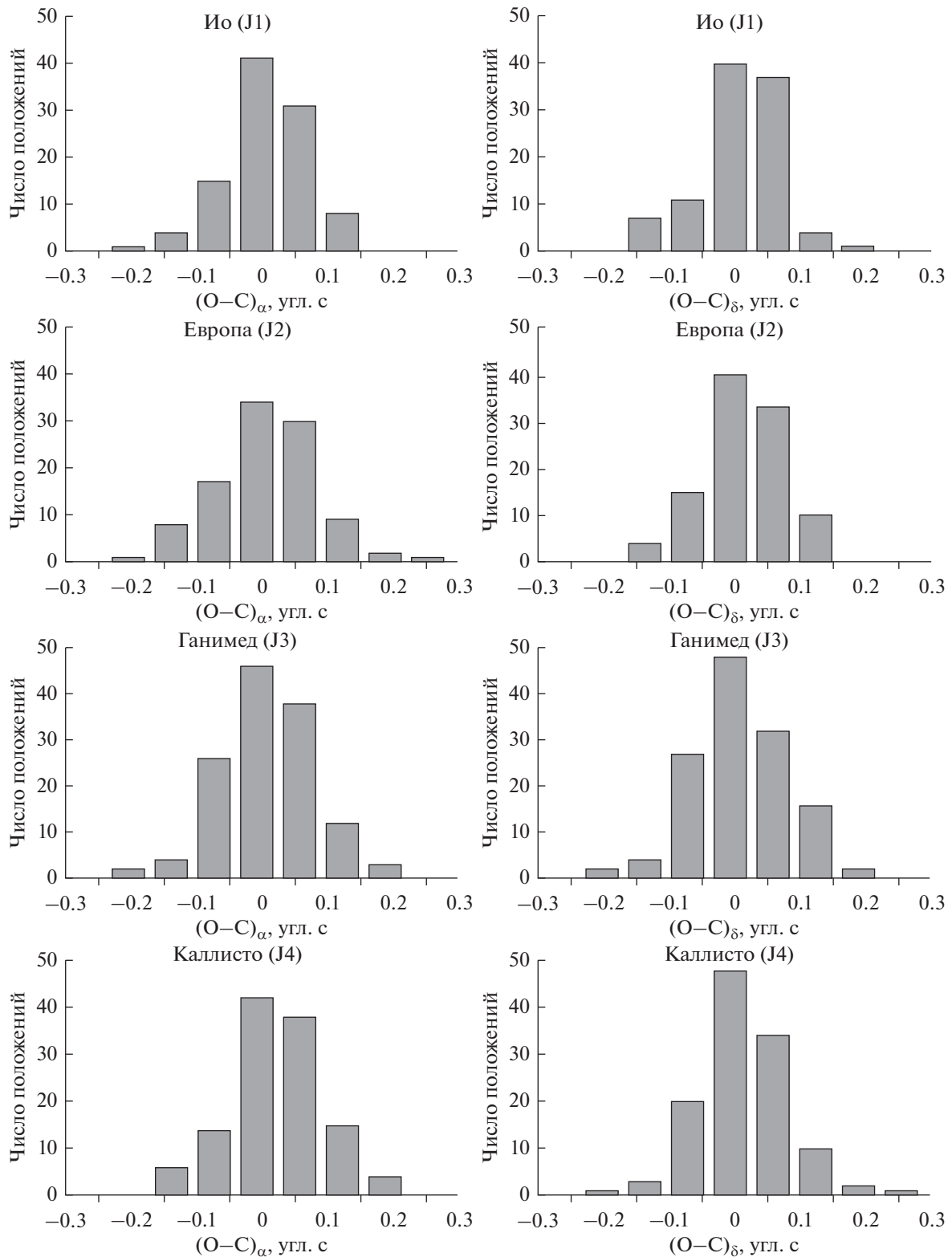


Рис. 1. Гистограммы распределений разностей $(O-C)$ по прямому восхождению ($\Delta\alpha\cos\delta$) и по склонению ($\Delta\delta$) для положений галилеевых спутников.

тельных координат спутников ($J_i - J_j$): $\Delta\alpha\cos\delta$, $\Delta\delta$ по двум сезонам наблюдений. В 2016–2017 гг. величины средних значений $(O-C)$ дифференци-

альных координат спутников получились почти на порядок меньше, чем для экваториальных координат Галилеевых спутников. В 2018 г. согласо-

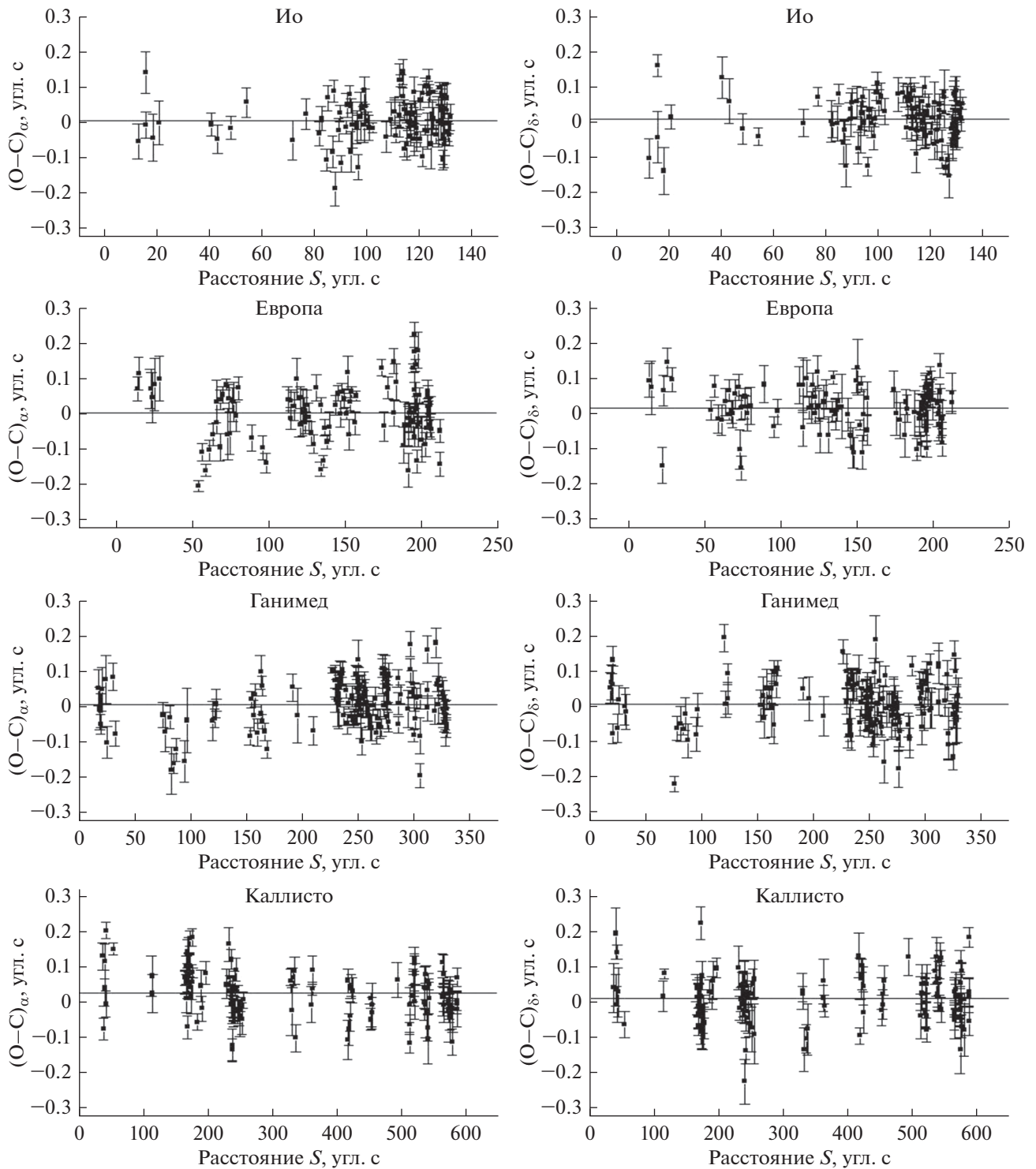


Рис. 2. Поведение разностей $(O-C)$ по прямому восхождению и склонению в зависимости от видимого углового расстояния между Юпитером и галилеевыми спутниками (S), комбинация теорий: EPM2017 + V. Lainey-V.2.0|V1.1. Для каждого положения приведены ошибки среднего.

вание между результатами очень хорошее по обеим координатам. Вероятнее всего, это связано с традиционной для подобного вида наблюдений проблемой, называемой астрометристами “уравнением блеска”. Спутники Юпитера являются

довольно яркими объектами, а параметры привязки к опорной системе определяются по сравнительно слабым ($13-14^m$) звездам из Gaia DR1. Количество же опорных звезд на кадре, в связи с приближением Юпитера к Млечному пути в ны-

Таблица 4

а) Средние значения (O–C) с их ошибками для разных видов результатов, сезон 2016–2017 гг.

Наблюдения	(O–C) _α , угл. с	(O–C) _δ , угл. с	ε _α , угл. с	ε _δ , угл. с	σ _α , угл. с	σ _δ , угл. с	N
Галилеевы спутники (α, δ)	0.0276	0.0132	0.0020	0.0027	0.0546	0.0757	761
(Ji – Jj): Δαcos δ, Δδ	–0.0062	0.0021	0.0020	0.0027	0.0572	0.0801	854

б) Средние значения (O–C) с их ошибками для разных видов результатов, сезон 2018 г.

Наблюдения	(O–C) _α , угл. с	(O–C) _δ , угл. с	ε _α , угл. с	ε _δ , угл. с	σ _α , угл. с	σ _δ , угл. с	N
Галилеевы спутники (α, δ)	0.0082	0.0086	0.0027	0.0025	0.0573	0.0534	455
(Ji – Jj): Δαcos δ, Δδ	–0.0084	0.0097	0.0022	0.0019	0.0575	0.0493	671

нешнем наблюдательном сезоне, было значительно больше (2016–2017 гг.: от 6 до 18; 2018 г.: от 17 до 46). Увеличение числа опорных звезд обеспечило более качественную привязку результатов к системе Gaia DR1, так как эффекты дифференциальной атмосферной рефракции в малом поле астрографа в значительной мере учитываются линейной моделью редукции.

Уравнение блеска чаще всего проявляет себя как сдвиг нуля-пункта, дающего значимое отклонение в (O–C) для экваториальных координат. При этом масштаб оценивается корректно, что приводит к отсутствию систематических ошибок в определении разностей координат. Различные способы оценки эффекта “уравнения блеска” годятся для отдельных ночей, но ухудшают ситуацию в другие. Имея все это ввиду, можно утверждать, что разности координат вида “спутник–спутник” скорее всего более информативны для совершенствования теорий движения спутников Юпитера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За 2018 г. было получено 452 положения галилеевых спутников в системе каталога Gaia DR1 (ICRS, J2000.0) и 671 разность координат вида “спутник–спутник”. Полученные результаты сравнивались с восемью наиболее современными теориями движения планет и спутников. В среднем (O–C) по обеим координатам относительно всех теорий движения не превышает 0.014″. Самое лучшее согласие с наблюдениями дают комбинации планетной теории движения EPM2017 с каждой из четырех спутниковых теорий V. Lainey-V.2.0|V1.1, V. Lainey-V.1.1, J.-E. Arlot-G5, J.H. Lieske-E5, при использовании которых средние значения (O–C) за весь наблюдательный период около 0.01″. Сравнение результатов за четыре сезона наших наблюдений показывает значительное улучшение сходимости реальных наблюдений с выбранными нами теориями движения планет и спутников. По всем проведенным нами исследованиям полученных результатов наблюдается их хорошее согласие с современными теориями движения.

Данные табл. 3 демонстрируют рост качества пулковских наблюдений в последние годы, а в тексте упомянуты причины, приведшие к этому. Это позволит в ближайшем будущем перейти к тому, что астрометрические наблюдения станут не только средством контроля качества эфемерид и источником данных для их совершенствования. Имея многолетний ряд наблюдений на таком уровне точности, можно попытаться оценить вклад приливных эффектов и смещений в положениях спутников, вызванных неравномерностью распределения альбедо по их поверхностям. Сейчас последний эффект серьезно рассматривается в основном при анализе результатов наблюдений взаимных явлений в системе спутников Юпитера (Saquet и др., 2018; Vasundhara и др., 2017), где он достигает сотых долей угловой секунды. Поэтому в дальнейшем планируется провести соответствующий анализ пулковских рядов наблюдений спутников Юпитера, дополнив его результатами переработки старых фотографических наблюдений в новой опорной системе.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-02-00843 А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Грошева Е.А., Измайлов И.С., Киселева Т.П. Астрометрические наблюдения главных спутников Сатурна на 26-дюймовом рефракторе // Астрон. вестн. 2011. Т. 45. № 6. С. 537–541. (Grosheva E.A., Izmailov I.S., Kiseleva T.P. Astrometric observations of major satellites of Saturn with a 26-inch refractor // Sol. Syst. Res. 2011. V. 45. Iss. 6. P. 523–528.)
- Емельянов Н.В., Арло Ж.-Ю., Варфоломеев М.И., Вахковьяк С.Н., Кантер А.А., Кудрявцев С.М., Насонова Л.П., Уральская В.С. Создание теории движения, эфемерид и баз данных для естественных спутников планет // Космич. исслед. 2006. Т. 44. № 2. С. 136–145.
- Киселева Т.П., Киселев А.А., Калинин О.А., Васильева Т.А., Ховричева М.Л. Результаты наблюдений галилеевых спутников Юпитера в Пулковской обсерватории в 1986–2005 гг. // Астрон. вестн. 2008. Т. 42. № 5. С. 443–462. (Kiseleva T.P., Kiselev A.A., Kalinichenko O.A., Vasilyeva T.A., Khovrichева M.L. Results of astrometric observations of Jupiter’s Galile-

- an satellites at the Pulkovo Observatory from 1986 to 2005 // *Sol. Syst. Res.* 2008. V. 42. № 5. P. 414–433.)
- Наризная Н.В. Результаты наблюдений Галилеевых спутников Юпитера на Пулковском нормальном астрографе в период 2009–2011 гг. // *Астрон. вестн.* 2015. Т. 49. № 6. С. 420–427. (*Narizhnaya N.V.* Observations of the Galilean Satellites of Jupiter with Pulkovo Normal Astrograph during 2009–2011 // *Sol. Syst. Res.* 2015. V. 49. № 6. P. 383–390.)
- Наризная Н.В. Наблюдения Галилеевых спутников Юпитера в 2013–2015 гг. в Пулковке // *Астрон. Вестн.* 2016. Т. 50. № 5. С. 364–371. (*Narizhnaya N.V.* Observations of the Galilean Moons of Jupiter in 2013–2015 at Pulkovo // *Sol. Syst. Res.* 2016. V. 50. № 5. P. 344–351.)
- Наризная Н.В., Ховричев М.Ю., Анетян А.А., Биколова Д.А., Ершова А.П., Бальяев И.А., Куликова А.М., Оськина К.И., Максимова Л.А. Астрометрические наблюдения галилеевых спутников Юпитера на пулковском Нормальном астрографе в 2016–2017 гг. // *Астрон. Вестн.* 2018. Т. 52. № 4. С. 316–323. (*Narizhnaya N.V., Khovrichhev M.Yu., Apetyan A.A., Bikulova D.A., Ershova A.P., Balyaev I.A., Kulikova A.M., O'skina K.I., Maksimova L.A.* Astrometric Observations of the Galilean Moons of Jupiter at the Pulkovo Normal Astrograph in 2016–2017. // *Sol. Syst. Res.* 2018. V. 52. Iss. 4. P. 312–319.)
- Питьева Е.В., Павлов Д. ЕРМ2017 и ЕРМ2017Н // ИПА РАН. Лаборатория Эфемеридной астрономии. 2017. 7 ноября. (<http://iaaras.ru/en/dept/ephemeris/epm/2017/>).
- Arenou F., Luri X., Babusiaux C., Fabricius C., Helmi A., Robin A.C., Vallenari A., Blanco-Cuaresma S., Cantataudin T., Findeisen K., Reyle C., Ruiz-Dern L., Sordo R., Turon C., Walton N.A., Shih I.-C., Antiche E., Barache C., Barros M., Breddels M., Carrasco J.M., Costigan G., Diakite S., Eyer L., Figueras F., Galluccio L., Heu J., Jordi C., Krone-Martins A., Lallement R., Lambert S., Leclerc N., Marrese P.M., Moitinho A., Mor R., Romero-Gomez M., Sartoretti P., Soria S., Soubiran C., Souchay J., Veljanoski J., Ziaepour H., Giffida G., Pancino E., Bragaglia A. Gaia Data Release 1. Catalogue validation // *Astron. and Astrophys.* 2017. V. 599. A50. P. 1–50.
- Arlot J.-E. A new constants, for Sampson-Lieske theory of the Galilean satellites of Jupiter // *Astron. and Astrophys.* 1982. V. 107. P. 305–310.
- Arlot J.-E., Emelyanov N.V. The NSDB natural satellites astrometric database // *Astron. and Astrophys.* 2009. V. 503. Iss. 2. P. 631–638.
- Arlot J.E., Cooper N., Emelyanov N., Lainey V. Meunier L.E., Murray C., Oberst J., Pascu D., Pasewaldt A., Robert V., Tajeddine R., Willner K. The natural satellites astrometric data from either space probes and ground-based observatories produced by the European consortium “ESPaCE” // *Notes Scientifiques et Techniques de l’Institut de mécanique celeste.* 2017. P. 50.
- Del Rio Gaztelurrutia T., Hernandez-Bernal J., Almendros V., Otxoa I., de Ormaetxea A., Sanchez-Lavega A. Observation of the motion of major satellites of Saturn, Uranus and Neptune: A practice in astrodynamics // *Amer. Astron. Soc.* 2018. DPS meeting #50, id.221.04, 10/2018 (2018DPS....5022104D).
- Emelyanov N.V., Arlot J.-E. The natural satellites ephemerides facility MULTI-SAT // *Astron. and Astrophys.* 2008. V. 487. P. 759–765.
- Fienga A., Laskar J., Morley T., Manche H., Kuchynka P., Le Poncin-Lafitte C., Budnik F., Gastineau M., Somenzi L. INPOP08, a 4-D planetary ephemeris: from asteroid and time-scale computations to ESA Mars Express and Venus Express contributions // *Astron. and Astrophys.* 2009. V. 507. P. 1675–1686.
- Folkner W.M., Williams J.G., Boggs D.H., Park R.S., Kuchynka P. The planetary and lunar ephemerides DE430 and DE431 // *Interplanetary Network Progress Report.* 2014. V. 42–196. P. 1–81.
- Lainey V., Vienne A., Duriez L. New accurate ephemerides for the Galilean satellites of Jupiter. I. Numerical integration of elaborated equations of motion // *Astron. and Astrophys.* 2004a. V. 420. P. 1171–1183.
- Lainey V., Arlot J.E., Duriez L. New accurate ephemerides for the Galilean satellites of Jupiter. II. Fitting the observations // *Astron. and Astrophys.* 2004b. V. 427. P. 371–376.
- Lainey V., Duriez L., Vienne A. Synthetic representation of the Galilean satellites' orbital motions from L1 ephemerides // *Astron. and Astrophys.* 2006. V. 456. № 2. P. 783–788.
- Lainey V. Quantification of tidal parameters from Solar System data // *Celest. Mech. and Dyn. Astron.* 2016. V. 126. Iss. 1–3. P. 145–156.
- Lieske J.H. Galilean satellites ephemerides E5 // *Astron. and Astrophys. Suppl.* 1998. V. 129. P. 205–217.
- Morgado B., Vieira-Martins R., Assafin M., Machado D.I., Camargo J.I.B., Sfair R., Malacarne M., Braga-Ribas F., Robert V., Bassallo T., Benedetti-Rossi G., Boldrin L.A., Borderes-Motta G., Camargo B.C.B., Crispim A., Dias-Oliveira A., Gomes-Júnior A.R., Lainey V., Miranda J.O., Moura T.S., Ribeiro F.K., Santana T., Santos-Filho S., Trabuco L.L., Winter O.C., Yamashita T.A.R. APPROX mutual approximations between the Galilean moons: The 2016–2018 observational campaign // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2019. V. 482. Iss. 4. P. 5190–5200.
- Nauenberg M. Atmospheric refraction predictions based on actual atmospheric pressure and temperature data // *Publ. Astron. Soc. Pacific.* 2017. V. 129. Iss. 974. P. 044503.
- Peng Q.Y., He H.F., Lainey V., Vienne A. Precise CCD positions of Galilean satellite-pairs // *Mon. Notic. Ray. Astron. Soc.* 2012. V. 419. P. 1977–1982.
- Pitjeva E.V., Pitjev N.P. Mass of the Kuiper belt // *Celest. Mech. Dyn. Astron.* 2018. V. 130. Iss. 9. Article id. 57. P. 17.
- Saquet E., Emelyanov N., Robert V., Arlot J.-E., Anbazhagan P., Baillié K., Bardecker J., Berezchnoy A.A., Bretton M., Campos F., Capannoli L., Carry B., Castet M., Charbonnier Y., Chernikov M.M., Christou A., Colas F., Coliac J.-F., Dangi G., Dechambre O. The PHEMU15 catalogue and astrometric results of the Jupiter's Galilean satellite mutual occultation and eclipse observations made in 2014–2015 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2018. V. 474. Iss. 4. P. 4730–4739.
- Vasundhara R., Selvakumar G., Anbazhagan P. Analysis of mutual events of Galilean satellites observed from VBO during 2014–2015 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2017. V. 468. Iss. 1. P. 501–508.
- Viswanathan V., Fienga A., Gastineau M., Laskar J. INPOP17a planetary ephemerides // *Notes Scientifiques et Techniques de l’Institut de mécanique celeste.* 2017. № 108. P. 39.
- Viswanathan V., Fienga A., Minazzoli O., Bernus L., Laskar J., Gastineau M. The new lunar ephemeris INPOP17a and its application to fundamental physics // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2018. V. 476. Iss. 2. P. 1877–1888.